

***Vulnerabilidad del acuífero del río Magdalena ante la contaminación, métodos
DRASTIC, GOD y SINTACS en el departamento del Atlántico.***

Juan David Espitia Fernández

Pregrado de Geología

Departamento de Física y Geociencias – Universidad del Norte

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:

Geólogo

Directora

Natalia Hoyos Botero

Universidad del Norte, Barranquilla

Junio de 2020

Resumen

Actualmente en el departamento del Atlántico una de las principales fuentes y reservas de agua se presentan en los acuíferos. Sin embargo, no se han descrito correctamente cuales son los sectores o las áreas que están más propensas a verse afectadas negativamente por agentes contaminantes mediante la lixiviación y percolación del agua. Por medio de los métodos GOD, DRASTIC y SINTACS se pretende analizar la vulnerabilidad del acuífero río Magdalena, teniendo en cuenta diferentes temporadas climatológicas (año seco, año húmedo y de transición). Para las variables recarga del acuífero, precipitación y evapotranspiración se generaron mapas para los meses de enero (estación seca), julio (transición) y octubre (estación de lluvia) de 1994, 2001 y 2010, años que representan condiciones de precipitación por debajo del promedio, promedio y por encima del promedio, respectivamente. Se obtuvo como resultado que los municipios de Soledad, Malambo y Santa Lucia presentan mayor riesgo dentro del área de estudio. Además, según el método GOD los niveles de vulnerabilidad relevantes se encuentran en el rango de 0.7 a 1, hacia el norte del departamento, concordando con los métodos DRASTIC y SINTACS, donde se presentan valores de vulnerabilidad de alta a muy alta con valores de (147 – 230) y (140 – 260) para la misma zona. Se determinó que el periodo de menor vulnerabilidad concuerda con el mes enero del año 1994, mientras que el de mayor vulnerabilidad corresponde al mes de octubre del mismo año.

Palabras clave: Vulnerabilidad, acuífero, Hidrogeología, DRASTIC, SINTACS, GOD

Abstract

Aquifers are one of main sources of freshwater in the Atlántico Department of the Colombian Caribbean. However, the areas that are most likely to be negatively affected by pollutants through water leaching and percolation have not been correctly described. We analyzed the vulnerability of the Magdalena river aquifer using the GOD, DRASTIC and SINTACS methods, which include variables related to water depth, unsaturated soil, type of soil, water environment, slope, and others. This analysis were performed for different climatic conditions. We generated a series of maps for variables related to infiltration like aquifer recharge, precipitation and evapotranspiration for the months of January (dry season), July (transition) and October (wet season), for the years 1994 (drier than average), 2001 (average) and 2010 (wetter than average). Our results show that the municipalities of Soledad, Malambo and Santa Lucia present greater risk present the greatest risk within the study area. In addition according to the GOD method, high levels of vulnerability (0.7 to 1), are located towards the north of the department, By comparison, the DRASTIC and SINTACS methods, show high to very high levels of vulnerability (147 to 230 and 140 to 260, respectively). The period of least vulnerability was January of 1994 while the period of greatest vulnerability was October of the same year

Keywords: Vulnerability, aquifer, Hydrogeology, DRASTIC, SINTACS, GOD

Tabla de contenidos

1. Introducción.....	6
2. Justificación	7
3. Vacíos y/o pregunta a responder	8
4. Objetivos.....	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos.....	9
5. Área de estudio	9
5.1. Geología	9
5.2. Climatología	10
6. Metodología.....	11
6.1. Método GOD	12
6.2. Método DRASTIC.....	13
6.3. Método SINTACS	16
7. Resultados y discusión	17
7.1. Método GOD	17
7.2. Método DRASTIC.....	18
7.3. Método SINTACS	22
8. Conclusiones.....	26
9. Agradecimientos	27
10. Referencias	28

Lista de tablas

<i>Tabla 1. El título debe ser breve y descriptivo.</i>	11
<i>Tabla 2. Porcentajes de área afectada por mes y año para el acuífero del río Magdalena. Método DRASTIC</i>	22
<i>Tabla 3. Porcentajes de área afectada por mes y año para el acuífero del río Magdalena. Método SINTACS</i>	26
<i>Tabla A1. Parametros de ponderacion DRASTIC</i>	31
<i>Tabla A2. Parametros de ponderacion SINTACS</i>	31
<i>Tabla A3. Valoracion de intensidad del factor D</i>	31
<i>Tabla A4. Valoracion para el parametro R</i>	31
<i>Tabla A6. Valoracion para el parametro A</i>	32
<i>Tabla A7. Valoracion para el parametro S</i>	32
<i>Tabla A8. Valoracion para el parametro T</i>	32
<i>Tabla A9. Valoracion para el parametro I</i>	33
<i>Tabla A10. Valoracion para el parametro C</i>	33

Lista de figuras

<i>Figura 1. Sistema acuífero del río Magdalena, área de estudio.</i>	10
<i>Figura 2. Diagrama esquemático para el cálculo de la escorrentía directa Q.</i>	15
<i>Figura 3. Mapa de vulnerabilidad según el método GOD.</i>	17
<i>Figura 4. Mapas según método DRASTIC, meses de enero, julio y octubre (Año 1994) ...</i>	21
<i>Figura 5. Mapas según método DRASTIC, meses de enero, julio y octubre (Año 2001) ...</i>	21
<i>Figura 6. Mapas según método DRASTIC, meses de enero, julio y octubre (Año 2010) ...</i>	22
<i>Figura 7. Mapas según método SINTACS, meses de enero, julio y octubre (Año 1994)....</i>	24
<i>Figura 8. Mapas según método SINTACS, meses de enero, julio y octubre (Año 2001)....</i>	24
<i>Figura 9. Mapas según método SINTACS, meses de enero, julio y octubre (Año 2010)....</i>	25
<i>Figura A1. Profundidad del agua para el acuífero del río Magdalena.....</i>	34
<i>Figura A2. Sustrato no saturado para el acuífero del río Magdalena.....</i>	34

1. Introducción

Los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen una de las herramientas informáticas más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales (Sarr, 2006). Estos permiten evaluar y analizar las amenazas a las que ciertas áreas pueden estar sujetas, con el fin de evaluar los distintos casos de riesgo a los que podría llegar a ser afectado el recurso natural y por consiguiente las poblaciones urbanas y rurales que allí habiten (Lavao Pastrana, Sergio Andrés; Corredor Rivera, 2014).

Las metodologías DRASTIC, GOD y SINTACS han sido implementadas en acuíferos para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca en el agua subterránea, que se puede entender cómo la sensibilidad en la calidad del agua ante una carga contaminante impuesta (Foster et al 1987). El método GOD se caracteriza por mostrar una primera aproximación a las condiciones de vulnerabilidad en el acuífero de estudio o en zonas de escasa información, debido a que se tienen en cuenta solo tres variables (Confinamiento del acuífero, profundidad del agua subterránea y tipo de confinamiento del acuífero) (Vargas Quintero, 2010). Por otra parte, los métodos DRASTIC y SINTACS, son utilizados para asignar de manera simple y estandarizada la susceptibilidad de ciertas áreas a la contaminación, bajo ciertas condiciones (Ben & Villarroya, 2016). Esto, permite evaluar las cargas contaminantes y determinar el grado de vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables (Agüero 2000).

Estudios como los de Ben & Villarroya (2016) en el departamento del Atlántico, utilizan métodos como lo son DRASTIC y SINTACS para el cálculo de la vulnerabilidad en

función de establecer una base para la gestión ambiental y protección del agua subterránea. De igual forma, la CRA (Corporación Regional del Atlántico) es la encargada de conceder permisos de extracción del recurso hídrico en los distintos acuíferos en el Departamento del Atlántico, región Caribe de Colombia. Los principales usos del agua subterránea en este departamento son los pecuarios e industrial que corresponden aproximadamente a un 76 % del uso del agua en la región (CRA, 2016). Aquí entra en función la importancia de tener modelos y futuras investigaciones orientadas a la protección de los acuíferos ante la contaminación potencial antrópica.

En este proyecto se tiene como objetivo determinar la vulnerabilidad del acuífero río Magdalena (Departamento del Atlántico) según las tres metodologías mencionadas, y para diferentes condiciones climáticas intra e interanuales del análisis de las variables de recarga neta potencial, precipitación y evapotranspiración.

2. Justificación

El acuífero del río Magdalena es de vital importancia debido al uso y la alta dependencia de las aguas subterráneas en el departamento del Atlántico. Según la CRA (2016) del acuífero se extraen alrededor de un 80% de agua de la totalidad utilizada en los municipios de Ponedera, Manatí y Santa Lucía. Además, contiene y almacena una proporción considerable del suministro de agua para el departamento, teniendo en cuenta la extensión lateral del mismo y los aportes de este en comunidades rurales en donde es a menudo la única fuente de agua. Estudios como los de CRA SHI (2016) para el método DRASTIC reflejan en el área analizada valores de vulnerabilidad entre moderados y altos, sin obtenerse valores de vulnerabilidad muy altos para los municipios de Sabanagrande, Malambo y Soledad. Estos

resultados sugieren medidas preventivas para el departamento del Atlántico siendo este una cualitativa y subjetiva (CRA SHI, 2016).

El presente trabajo surge de la necesidad de conocer el grado de vulnerabilidad del acuífero río Magdalena a través de varias metodologías que nos permitirán conocer las condiciones intrínsecas del agua subterránea en el sistema y aportar a estudios hidrológicos teniendo en cuenta los periodos climatológicos secos (Diciembre – Marzo), de transición (Abril y Noviembre) y húmedos (Mayo – Octubre) representando las condiciones actuales. Al mismo tiempo se busca la generación de una base de datos, con la información utilizada en los modelos de vulnerabilidad, en donde, las comunidades tanto urbanas como rurales puedan conocer que tan propensa es el agua subterránea en este sistema a ser contaminada por agentes externos y/o pueda ser utilizada como fuente alternativa en tiempos secos.

3. Vacío, problema y/o pregunta a responder

La Corporación Regional del Atlántico (CRA) tiene a su cargo el registro de los niveles del agua subterránea para los sistemas acuíferos para el licenciamiento y otorgación de concesiones de perforación y extracción del recurso hídrico en el sector agrícola y piscícola (IDEAM, 2019). Sin embargo, no se ha analizado en qué proporción los cambios meteorológicos y antrópicos actuales, tales como disminución en niveles estáticos y alteraciones en ciclos de recarga de acuíferos, pueden afectar las aguas subterráneas del acuífero de río Magdalena en el departamento del Atlántico. Por otra parte, estudios como los de Tudesca, Rafael & Ávila, Humberto (2015) ilustran niveles de riesgo potencial, generado por la presencia de elementos microbianos en el agua no aptos para consumo humano en las captaciones de agua para los municipios de Ponedera, Manatí, Campo de la Cruz, Santa Lucía y Súan.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- Calcular el índice de vulnerabilidad para el acuífero del río Magdalena, a través de las metodologías de DRASTIC, GOD y SINTACS en el departamento del Atlántico.

4.2. Objetivos Específicos

- Generar una base de datos con la información recopilada y necesaria para la evaluación de la vulnerabilidad del acuífero de río Magdalena, departamento del Atlántico.
- Elaborar los mapas de vulnerabilidad para el acuífero del río Magdalena a través de los métodos de DRASTIC, GOD y SINTACS considerando la variabilidad de la precipitación intra e interanual.
- Comparar los índices de vulnerabilidad generados a través de los métodos DRASTIC, GOD y SINTACS para el acuífero del río Magdalena.
- Analizar la variable recarga neta para el acuífero del río Magdalena en el departamento del Atlántico.

5. Área de estudio

5.1. Geología

El sistema acuífero del río Magdalena se encuentra ubicado en el margen Occidental de departamento del Atlántico, a lo largo de casi todo el departamento con una extensión aproximada de 710 km², y está conformado por dos unidades hidrogeológicas principales: la unidad I1 hacia el norte: que comprende depósitos eólicos antiguos (Qe) con espesores de 5 a 15 m, de edad Pleistoceno – Holoceno, compuesta de arenas bien seleccionadas y

permeables, y la unidad I2 hacia el sur: que comprende depósitos de llanura aluvial (Qla1) y la formación Rotinet (Qpr) con espesores entre 5 y 100 m, de edad Pleistoceno, compuestas por gravas, limos y arcillas (CRA, 2016 & INGEOMINAS, 1985).

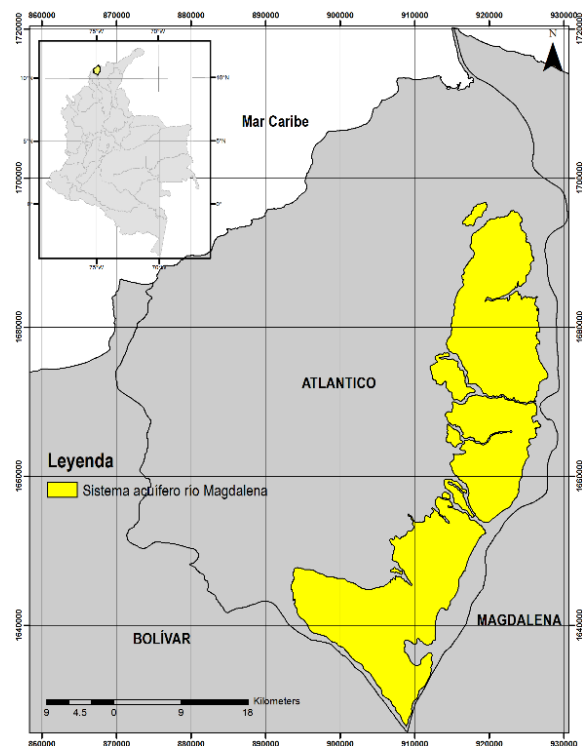


Figura 1. Sistema acuífero del río Magdalena, en el departamento del Atlántico.

5.2. Climatología

El Caribe Colombiano, y específicamente el departamento del Atlántico, presenta un clima tropical con una estacionalidad marcada, con dos temporadas secas y dos temporadas húmedas cada cuatro meses, es decir, un comportamiento bimodal en el transcurso del año con precipitaciones que oscilan entre 500 y 1000 mm de agua (IDEAM, 2019).

El primer periodo lluvioso se presenta desde abril hasta junio, seguido de un periodo seco que tiene lugar a mediados de año, entre junio y agosto. Luego, se presenta un segundo periodo lluvioso caracterizado por lluvias más abundantes desde septiembre hasta diciembre,

y finalmente un periodo seco que va desde diciembre hasta fines de marzo, cuando la sequía estacional predomina en la mayor parte de la región (Inger Daniel, 2015). Este ciclo tiene relación con la migración de la zona e convergencia internacional (ITCZ) (Dimar, 2020).

6. Metodología

En el presente estudio se aplicó el cálculo de la vulnerabilidad para el agua subterránea dentro del acuífero del río Magdalena mediante los modelos DRASTIC, GOD y SINTACS. Las variables analizadas así como sus principales características se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las variables utilizadas.

Datos	Resolución	Fuente	Descripción	Variable modelo
Precipitación	Departamental, resolución mensual	IDEAM	Cantidad de agua que por acciones climáticas llega a la superficie de la tierra	Precipitación mensual
Cobertura de suelo	Departamental	IGAC	Cobertura superficial dentro del área de estudio	Suelo
Topografía	Departamental, resolución 25 m	SGC	Valor de elevación con respecto al nivel medio del mar	Pendiente
Medio acuífero	Departamental	CRA	Tipo de material que conforma el acuífero	Litología del acuífero
Sistema acuífero río Magdalena	Departamental	CRA	Delimitación del área de estudio	Acuífero río Magdalena
Conductividad hidráulica	Departamental, resolución cm/día	CRA	Facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido	Conductividad hidráulica
Litología	Departamental	IGAC	Material del subsuelo no saturado de agua	Subsuelo no saturado
Evapotranspiración	Regional, resolución 250 m	MODIS	Cantidad de agua del suelo que es devuelta a la atmósfera	Evapotranspiración
Pozos, aljibes y manantiales	Departamental	CRA	Profundidades en metros de los niveles de agua	Profundidad del agua
Confinamiento del acuífero	Departamental	CRA	Tipo de confinamiento y ocurrencia del agua subterránea	Confinamiento
Limite departamental	Departamental	IGAC	Delimitación por departamentos	Limite departamental

Inicialmente, mediante el uso de la herramienta Matlab (v 2015b) se realizó la organización y visualización de las series de tiempo para 31 estaciones hidrometeorológicas a una resolución temporal mensual para el periodo 1990 a 2017 (ver anexo, figura A1), lo cual permitió identificar 3 periodos hidrológicos activos como lo son: periodo hidrogeológico seco (I), de transición (II) y húmedo (III). A partir de este análisis se seleccionaron los meses representativos de cada periodo: enero (seco), julio (transición) y octubre (húmedo).

La selección de años con condiciones de precipitación promedio, por debajo y por encima del promedio, se realizó a partir del análisis del índice de oscilación SOI (Southern Oscillation Index), donde se escogieron tres años representativos 1994, 2001 y 2010 (NOAA, 2020). Luego, se generaron superficies de precipitación para los meses y años seleccionados a través del método IDW disponible en QGIS (v 3.4.4), debido a que se presentaba el menor error en la obtención de estas.

Para la estimación de la evapotranspiración se utilizaron los datos recopilados por la misión MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA

6.1. Método GOD

Para la metodología GOD, se clasificaron las variables de confinamiento acuífero (G), litología de la zona no saturada (O) y profundidad del agua (D) un rango de 0 a 1 según Foster (1987) y la información de los pozos y niveles piezométricos proporcionados por la CRA. Para el caso del grado de confinamiento y profundidad del agua específicamente se generaron superficies de interpolación a través del método IDW debido al distanciamiento de los pozos. El método GOD establece la vulnerabilidad del acuífero en cinco categorías: muy baja (0 a

0.1), baja (0.1 a 0.3), moderada (0.3 a 0.5), alta (0.5 a 0.7) y extrema (0.7 a 1); siendo resultado de la multiplicación de cada variable.

$$Vulnerabilidad\ GOD = G * O * D \approx 0 - 1$$

Este tipo de mapas utiliza una serie limitada de variables y son utilizados en casos donde se cuenta con escasa información, o no se cubre la totalidad de un área que se quiere analizar, por lo que se considera una primera aproximación a la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, es decir, cambios en las condiciones del agua por contaminantes externos (Foster, 1987).

6.2. Método *DRASTIC*

Para la metodología DRASTIC, se tienen en cuenta dos parámetros principales: un parámetro de clasificación (r) y un parámetro de ponderación (w) con valores que van de 1 a 10 y de 1 a 5, respectivamente. Para este método se utilizan las variables de profundidad del agua (D), recarga neta (R), litología del acuífero (A), tipo de suelo (S), topografía (T), subsuelo no saturado (I) y conductividad hidráulica (C). Según Aller (1987), a cada variable se le asigna un valor de clasificación y uno de ponderación indicando el grado de influencia en el acuífero. Para nuestro caso se tuvo en cuenta las condiciones de no-pesticidas ilustradas en el anexo (tabla A2). El cálculo final de la vulnerabilidad según DRASTIC se realiza usando la siguiente ecuación:

$$Vulnerabilidad\ Drastic: (Dr * Dw) + (Rr * Rw) + (Ar * Aw) + (Sr * Sw) \\ + (Tr * Tw) + (Ir * Iw) + (Cr * Cw)$$

Dónde: r corresponde al valor de clasificación y w al factor de ponderación

Para la obtención de variable profundidad del agua (D) se utilizó la información de los pozos proporcionada por la CRA, de donde se genera la superficie de profundidad con una resolución de 250 m (Ver anexo, figura A1).

La variable de recarga neta (R) se calcula a partir de las variables de precipitación, evapotranspiración y escorrentía superficial ($R = P + ET - Q$). Para nuestro caso esta se toma como una recarga potencial al acuífero. La escorrentía superficial se calculó a partir del método del número de curva, desarrollado por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales de EE.UU (Natural Resources Conservation Service – NRCS) en el año 1984. En función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo y las condiciones antecedentes de humedad (Ven Te, C et al 1984). Donde a partir de un número adimensional CN (número de curva), que varía de 1 a 100, se indica el grado de escurrimiento directo que se puede presentar superficialmente (Lavao Pastrana, Sergio Andrés; Corredor Rivera, 2014). Cabe resaltar que esta metodología fue desarrollada inicialmente para la evaluación de la precipitación neta para la escala de eventos o tormentas con la finalidad de establecer el escurrimiento directo como respuesta de una precipitación efectiva (Monsalve Sáenz, 1995). El procedimiento utilizado para generar la variable de escorrentía superficial se presenta en la figura 2. En síntesis, para cada unidad de suelo se asigna un valor de CN con base en su potencial para generar escorrentía. A partir del CN se calcula un CN (I), CN (II) y un CN (III) para cada periodo hidrológico representativo (seco, de transición y húmedo) obteniendo así un valor S (diferencia de potencial máxima entre P y Q) para cada caso, y posteriormente la escorrentía superficial Q para el mes de interés.

Los valores para la recarga neta (mm) se calcula descrito con la siguiente formula:

$$R = P - ET - Q$$

Donde:

R: recarga neta; P: precipitación considerada, en pulgadas; ET: Evapotranspiración; Q: Escorrentía superficial

La variable de cobertura de suelos (S) se clasifico de acuerdo con el tipo de cobertura (NRCS, 2009) y el rango de parámetros definidos en DRASTIC (ver anexo, tablas A6 y A2). Así mismo se realizó la clasificación en el caso de las variables medio acuífero y sustrato litológico donde posteriormente se hizo el ajuste al área de estudio a evaluar.

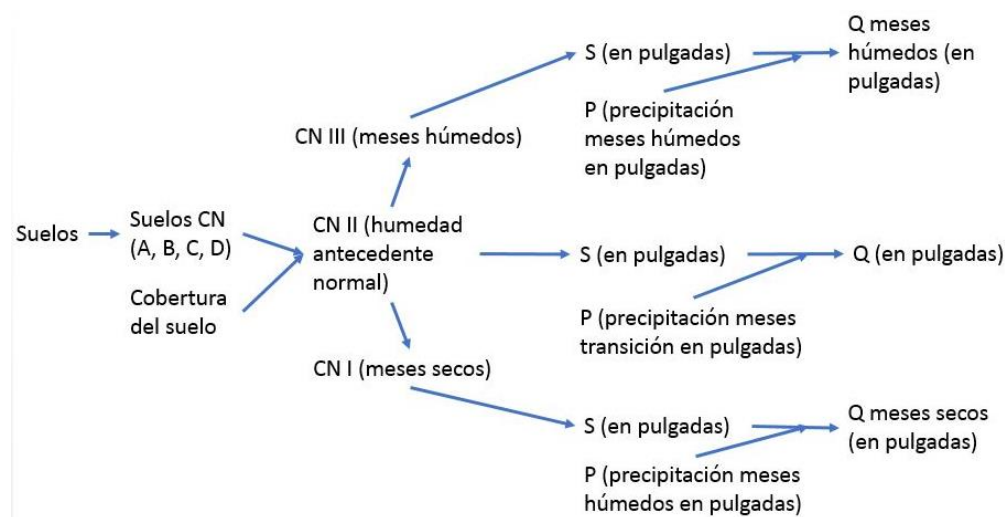


Figura 2. Diagrama esquemático para el cálculo de la escorrentía directa Q .

Para la obtención de variable pendiente (T) se utilizó el modelo digital de elevación proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano, y a partir del cual se generó la superficie de pendiente en ArcGIS, usando un tamaño de pixel de 250 m (Ver anexo, figura A1).

La variable del subsuelo no saturado (I) se obtuvo de la información del Servicio Geológico Colombiano (SGC), donde se le otorgo a cada litología que conforma la zona vadosa la clasificación según Aller (1987) (Ver Anexo, tabla A8).

La variable de conductividad hidráulica (C) se generó a raves de la información de la CRA, con una resolución de 250 m para la superficie del acuífero.

6.3. *Método SINTACS*

Por otro lado, para el método SINTACS consiste en un análisis por cuadrantes (en nuestro caso 250 m) de siete factores (iguales que en DRASTIC) que son: profundidad del nivel piezométrico (S), infiltración efectiva (I), capacidad de atenuación de la zona no saturada (N), tipo de suelo (T), características hidrogeológicas del acuífero (A), conductividad hidráulica (C) y pendiente (S_2). Este método fue desarrollado por Civita y De Maio (2000) donde se clasifican cada una de las variables con valores entre 1 a 10 y se ponderan en un rango de 1 a 5 según la influencia del acuífero. Este método considera cinco condiciones específicas de acuerdo a algunos aspectos hidrológicos, los cuales son: impacto normal (IN), impacto relevante (IR), drenaje (D), cárstico (C) y fracturamiento (F). Las condiciones de impacto normal y relevante hacen referencia a situaciones de impacto natural común y abundante respectivamente. La vulnerabilidad para este método se encuentra distribuida en seis niveles, en un rango que varía de 26 a 260 puntos (Civita y De Maio 2000) y se calcula según la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Vulnerabilidad Sintacs: } & (Sr * Sw) + (Ir * Iw) + (Nr * Nw) + (Tr * Tw) + (Ar * Aw) \\ & + (Cr * Cw) + (Sr * Sw) \end{aligned}$$

Dónde: r corresponde al valor de clasificación y w al factor de ponderación

Las capas espaciales que representan cada una de las variables indicadas se superpusieron usando las herramientas de raster calculator y weighted overlay de ArcGIS 10.5.

7. Resultados y discusión

Los valores para el parámetro profundidad del agua se obtuvieron entre los 2 y 24 metros presentándose hacia la parte Norte de la zona de estudio un cono de descenso marcado, producto de un bombeo constante y a poco distanciamiento mínimo en las diferentes captaciones de aljibes y pozos en los municipios de Soledad y Malambo (CRA, 2016). (Ver anexo, figura A1)

Para la variable sustrato litológico se obtuvo una superficie con resolución de 250 m, con los diferentes tipos de depósitos (Ver anexo, figura A2). Se pueden diferenciar principalmente depósitos eólicos en la zona norte correspondientes a la unidad hidrogeológica I1, y hacia la región sur depósitos limo arcillosos y mixtos sobres finos que componen la unidad hidrogeológica I2.

7.1. Método GOD

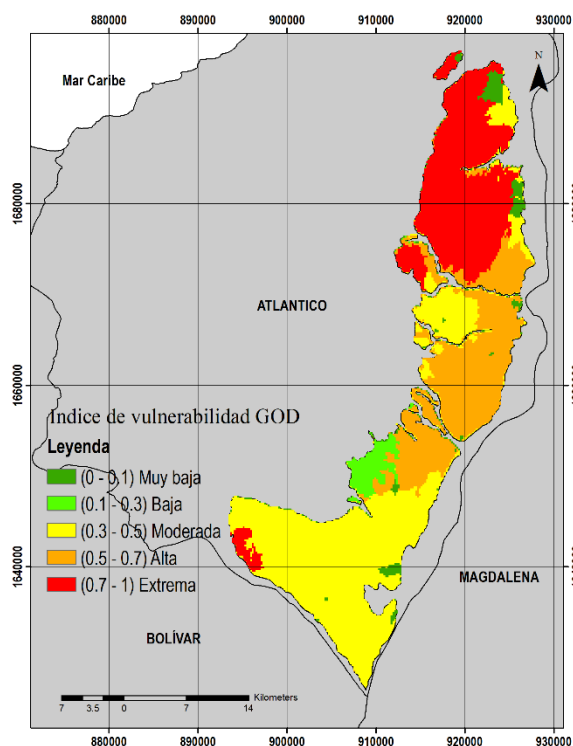


Figura 3. Mapa método GOD

Para este método se obtiene un índice de vulnerabilidad de muy bajo a extremo con valores entre 0 y 1 mediante la clasificación propuesta por Foster (1987). Se destacan hacia el norte del área una vulnerabilidad extrema con valores de 0.7 a 1, y en la región central índices de vulnerabilidad entre moderado y alto con valores de 0.3 a 0.7 representando un 63% del área. En el sector sur, se encuentra una región mucho más homogénea con vulnerabilidad moderada, y con algunas zonas en menor proporción de vulnerabilidad baja y extrema.

En algunas zonas se observan valores de vulnerabilidad muy diferentes en áreas adyacentes, lo cual está relacionado con la presencia de depósitos del tipo (1) areniscas y lutitas, (2) aluviales finos y (3) lutitas micáceas blandas principalmente. Para el caso de depósitos finos, la permeabilidad es menor impidiendo que el agua se infiltre y forme parte de la recarga potencial por precipitación del acuífero. Estas zonas presentan valores bajos de vulnerabilidad debido a la alta permeabilidad de los depósitos mencionados, actuado como obstáculo para el flujo del agua. La región Norte que muestra los valores de vulnerabilidad más altos (0.7 - 1) se encuentra conformada por depósitos de arenas eólicos, principalmente arenisca, con porosidades que van entre buena y muy buena. Esto permite que incluso en los sectores con niveles de agua más profundos, se presente una rápida infiltración y percolación, incrementando la vulnerabilidad a niveles extremos.

7.2. Método DRASTIC

Para el método DRASTIC se obtuvieron una serie de mapas para 3 meses (seco, transición y húmedo) en 3 años diferentes según el índice SOI (precipitación por debajo del promedio, promedio y por encima del promedio), con el fin de comparar los índices de vulnerabilidad para diferentes condiciones climatológicas intra e interanuales (Ver figuras 4, 5 y 6).

Para el mes seco (enero) en los años de 1994 y 2001 se obtienen valores en el índice de vulnerabilidad que van desde muy bajo a moderado en un rango de 23 a 146, principalmente en la región central de la zona de estudio. Sin embargo para el año 2010 se alcanzan valores altos (147 – 187) en un 22% del área total, principalmente hacia la zona norte. Este comportamiento se debe a que en el año 2010 la precipitación para este mes

alcanzo entre 200 y 360 mm, comparado con valores entre 50 – 120 mm para los años 1994 y 2001, respectivamente.

Para otro lado, en el mes de transición (julio) para los años 1994 y 2001 se logran alcanzar valores de vulnerabilidad entre moderada a muy alta (106 – 230) presentando similitudes con la temporalidad anterior en cuanto a tener mayores valores en la región Norte. Para el año 2010 a pesar de ser un año con altas precipitaciones, se observan valores de vulnerabilidad baja en el sector central, principalmente relacionados con altos valores de escorrentía que fluctúan entre los 69 y 178 mm/mes en comparación a los años de 1994 y 2001 que se registra niveles entre 30 y 70 mm/mes. El tipo de sustrato no saturado para la región central actúa además como línea de defensa (depósitos limo arcillosos) debido a la permeabilidad y propiedades de almacenamiento del agua.

Para el mes húmedo (octubre) se alcanzan los valores más elevados (180 – 230) en el índice de vulnerabilidad representando 44% del área total, debido esencialmente a los incrementos en los valores de la recarga neta (145 – 230 mm) en toda el área. Las zonas específicas con vulnerabilidad alta y muy alta se presentan en el sector norte y una franja de la zona sur, que corresponden a los municipios de Soledad, Malambo y Santa Lucia principalmente.

De manera general, se percibe que los niveles de mayor vulnerabilidad se presentan en las temporadas húmedas del año, principalmente en el norte y sur del área de estudio, y están relacionados con una alta recarga neta efectiva, a su vez producto de las características del sustrato que conforma la zona vadosa. En nuestro caso se presentan dos tipos de depósitos relacionados a altas vulnerabilidades que corresponden a depósitos eólicos y a depósitos aluviales recientes con valoraciones de 8 y 9 según el método. Estos depósitos tienen

porcentajes de arenas entre un 60 y 90 por ciento, con buenas permeabilidades y una buena selección en tamaño de las partículas (INGEOMINAS, 1985), permitiendo que el agua pueda infiltrarse hasta llegar al nivel freático y formar parte del acuífero.

Los resultados de vulnerabilidad para el año 1994 no siguieron el comportamiento esperado. De acuerdo al índice SOI y a los valores anuales de precipitación, este año registro lluvias por debajo del promedio. Sin embargo, las estaciones en el Sur y Norte del departamento registran valores de precipitación hasta 200 y 140 mm, generando que para el año en cuestión presente vulnerabilidad de moderada a alta en los meses de julio y octubre, y al mismo tiempo comportándose de forma similar que en años con precipitación promedio (2001) e incluso por encima del promedio (2010). A esto se le atribuyen los comportamientos

El nivel de la profundidad del agua en el acuífero es una de las variables con mayor influencia en el cálculo (Aller et al, 1987). Para esta investigación, se encontraron fluctuaciones a lo largo de la región con niveles entre 2 y 24 metros, por lo que es posible observar un cono de depresión o abatimiento en el anexo, figura A1, definiendo así, un flujo subterráneo local en dirección S-N. Este flujo permite que el contaminante transportado por el agua tienda a generar mayor afectación en el sector norte del área de estudio, representado por un nivel de vulnerabilidad muy alta (188 – 230).

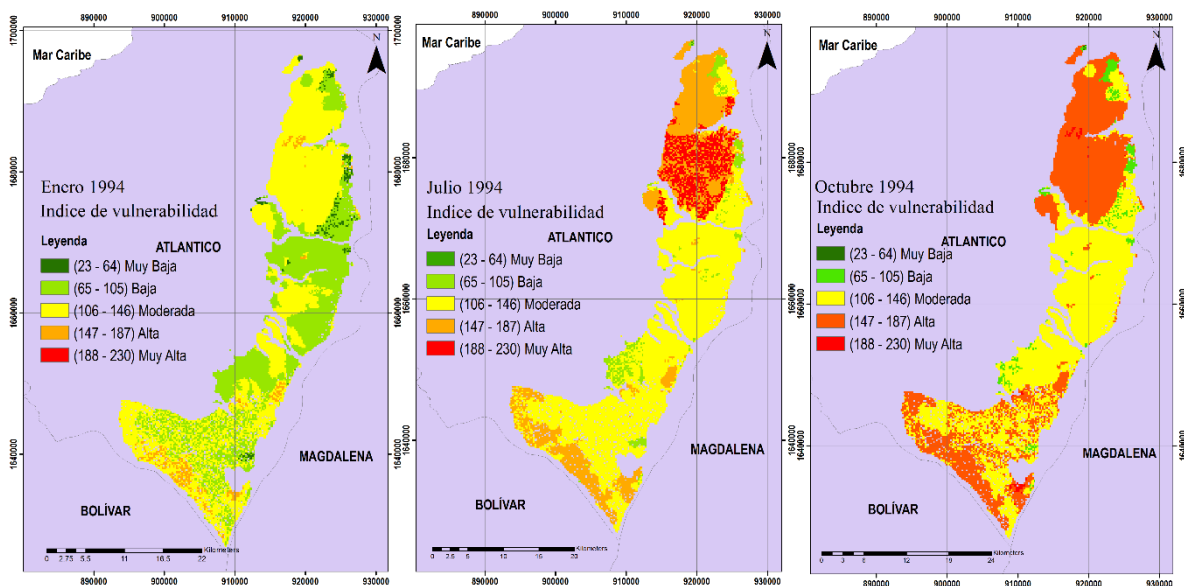


Figura 4. Mapas según método DRASTIC para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 1994)

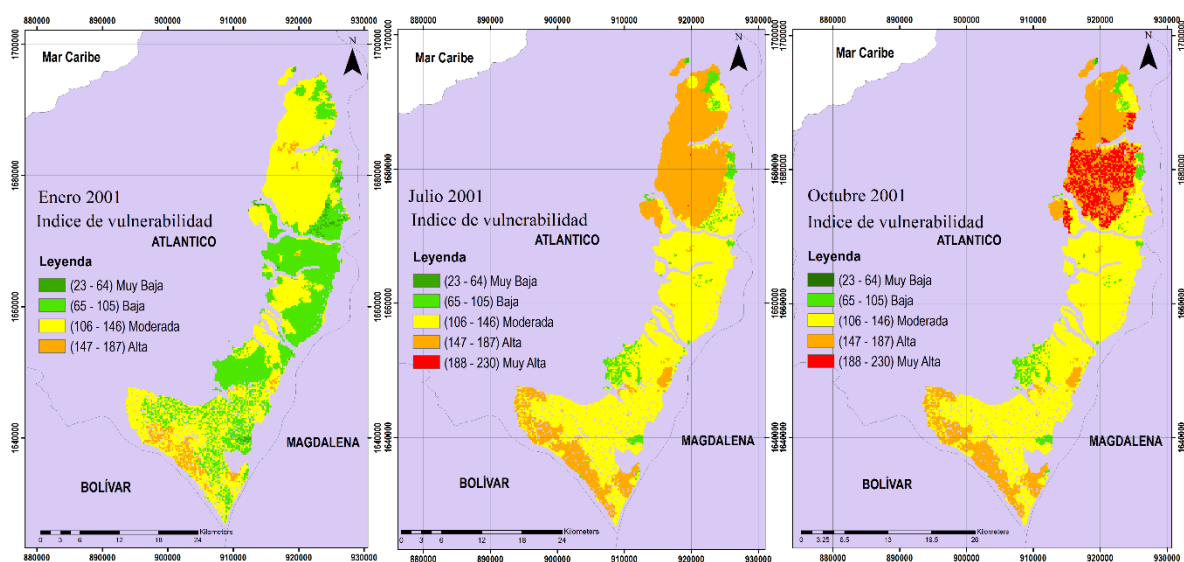


Figura 5. Mapas según método DRASTIC para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 2001)

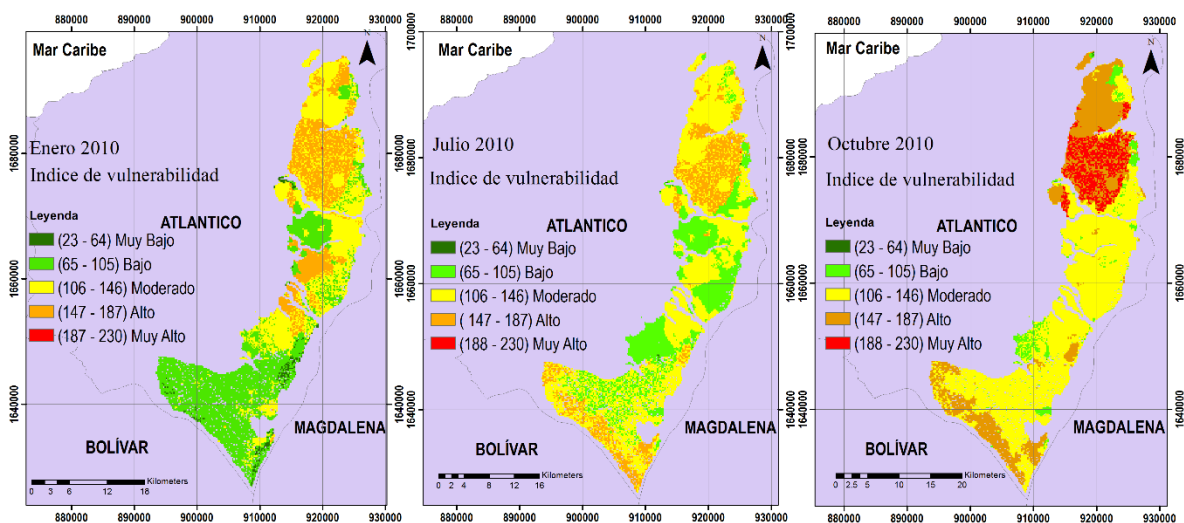


Figura 6. Mapas según método DRASTIC para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 2010)

Tabla 2. Porcentajes de área afectada por mes y año para el acuífero del río Magdalena. Método

Mes/Vulnerabilidad	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
1994					
Enero	1.6	39.8	55.4	3.1	0.1
Julio	0.2	4.4	58.7	26.9	9.8
Octubre	0.2	3.2	52.6	43.6	0.4
2001					
Enero	1.1	38.4	56.7	3.8	----
Julio	0.2	4.8	58.5	36.4	0.1
Octubre	0.2	4.3	58.7	27.1	9.7
2010					
Enero	1.7	41.5	37.1	19.5	0.2
Julio	0.9	27.8	55	16.25	0.05
Octubre	0.2	4.4	58.7	26.8	9.9

7.3. Método SINTACS

Para este método se utilizaron las ponderaciones que se muestran en el anexo tabla 2, específicamente para la ponderación de impacto relevante (IR), debido a que en este estudio se consideró realizar el cálculo de vulnerabilidad para la condición más extrema. Se

obtuvieron para los diferentes mapas índices de vulnerabilidad que van entre 26 (muy bajo) y 260 (Extremadamente alta).

Para el mes seco (enero) se obtiene una vulnerabilidad entre baja y muy alta (80 – 210) para los tres años analizados, demarcando en la región Norte del área como la zona con mayor vulnerabilidad para el agua subterránea. Estos resultados difieren del método DRASTIC por dos principales motivos: el primero de ellos se debe a que este último se mantiene en niveles entre muy bajo a alto (23 – 187) generalmente, y el segundo refleja que los niveles de mayor vulnerabilidad para el método SINTACS se concentran en la zona norte del área de estudio a excepción del año 1994.

Para el mes de transición (julio), los años 1994 y 2010 presentan valores de vulnerabilidad entre muy bajos y bajos (80 – 105). En comparación, en el año 2001 se obtiene un valor de vulnerabilidad extremadamente alto (210 – 260) en la zona central que equivale a un 8% por ciento del área. Es posible diferenciar tres casos para cada mes de transición (julio) por año, con valores de vulnerabilidad preferenciales por zonas. De menor a mayor vulnerabilidad, el primer caso para el año 2010 muestra valores generalmente bajos concordando casi que perfectamente con el mes de enero del mismo año. El segundo caso por su parte, se presenta para el año 1994 con valores de vulnerabilidad de baja a alta similar a lo obtenido en el método DRASTIC para los años 1994 y 2010.

Por otro lado, para el mes húmedo (octubre) de los tres diferentes años se observan valores de vulnerabilidad entre muy baja a extremadamente alta (20 – 260). Este mes no representa cambios relevantes en los valores de vulnerabilidad, manteniéndose las zonas con más alta vulnerabilidad hacia el norte del área. Para el año 2001 y 2010 se presentan valores de vulnerabilidad bajos (80 - 105), mientras que para el año 1994 se obtienen valores entre

muy alto y medio (105 – 186 y 186 – 210, respectivamente) concentrándose en el municipio de Santa Lucia. En comparación al método DRASTIC, para los años 2001 y 2010 se obtienen valores similares de vulnerabilidad para las mismas áreas, sin embargo para el año 1994 se obtienen niveles muy altos de vulnerabilidad (188 – 230).

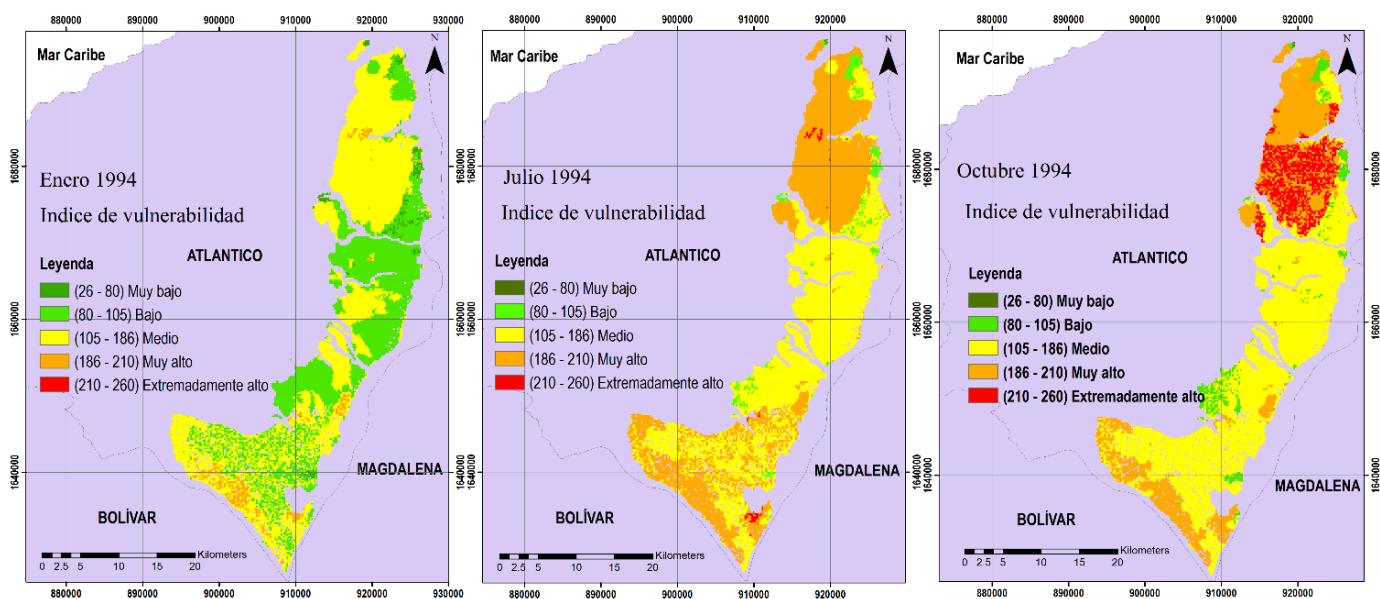


Figura 7. Mapas según método SINTACS para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 1994)

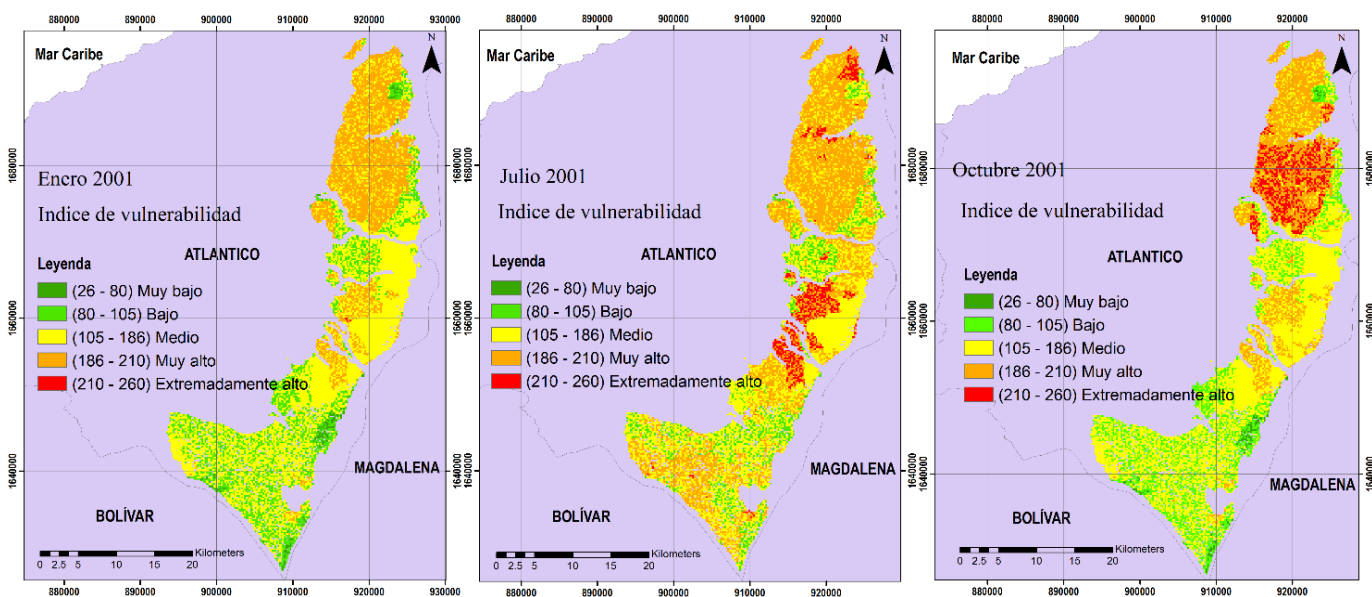


Figura 8. Mapas según método SINTACS para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 2001)

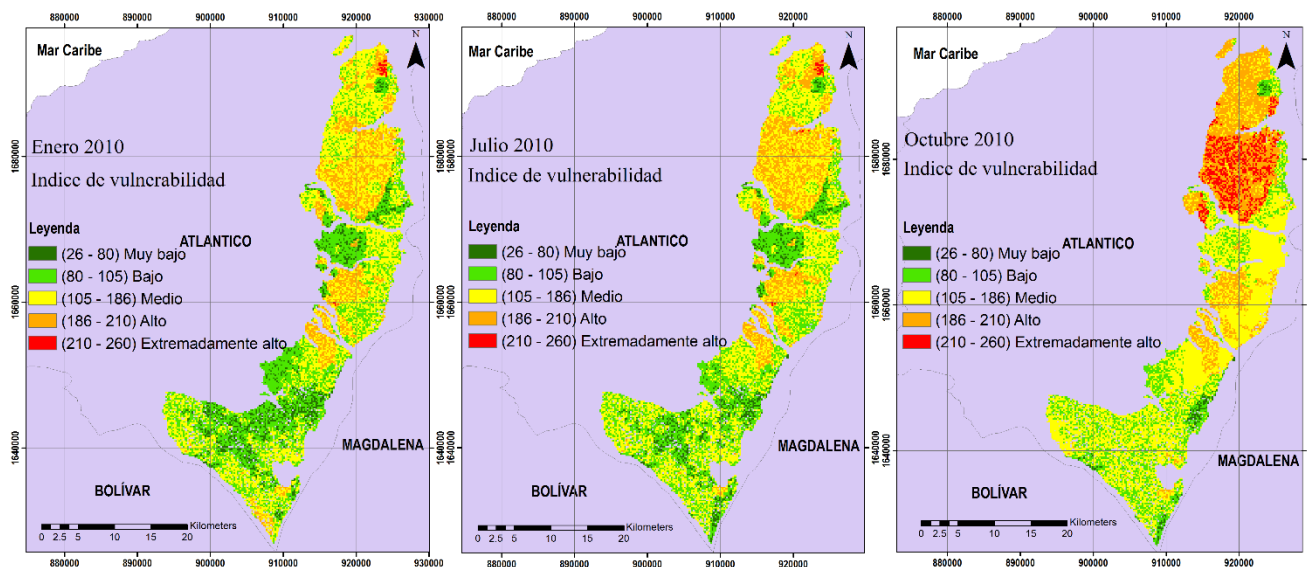


Figura 9. Mapas según método SINTACS para los meses Enero, Julio y Octubre (Año 2010)

Para el método SINTACS se puede observar que el nivel de detalle bajo la condición de impacto relevante (IR) permite diferenciar de mejor manera los límites entre las zonas más propensas a ser contaminadas por solutos lixiviados por la acción antrópica. De manera general, se continúa observando que los meses secos presentan una vulnerabilidad menor que los meses húmedos, debido a la mayor infiltración de agua durante los periodos de mayor precipitación. Para el año 2010 (año con precipitaciones por encima del promedio) no se presentan valores tan altos como en el año 1994, incluso son menores. Esto se debe principalmente a que los valores de influencia del acuífero varían entre los métodos. Para la variable de subsuelo no saturado pasa de una influencia de 2 en DRASTIC a 5 en SINTACS, dándole más importancia al tipo de depósitos en este último, por lo que se refleja en un cambio en el nivel de vulnerabilidad en los mapas obtenidos.

Se pudieron obtener para cada uno de los métodos GOD, DRASTIC y SINTACS los correspondientes índices de vulnerabilidad. Para los métodos DRASTIC y SINTACS se obtienen valores de mayor vulnerabilidad para los años 1994, 2001 y 2010 en el mes de octubre, debido principalmente por el tipo de depósitos (eólicos y aluviales recientes) y recarga neta efectiva.

Tabla 3. Porcentajes de área afectada por mes y año para el acuífero del río Magdalena. Método

Mes/Vulnerabilidad	Muy baja	Baja	Media	Muy alta	Extremadamente alta
1994					
Enero	1.6	39.8	55.4	3	0.2
Julio	0.2	3.2	52.6	43.6	0.4
Octubre	0.2	4.4	58.7	26.8	9.9
2001					
Enero	1.2	20.2	52.5	25.8	0.3
Julio	0.7	17.1	11.3	63.3	7.9
Octubre	1.2	19.5	49.4	23.1	6.8
2010					
Enero	7.4	36.2	42.8	13.3	0.3
Julio	6	33.6	44.6	15.4	0.4
Octubre	1.2	19.5	49.5	22.9	6.9

Conclusiones

Los resultados obtenidos para los tres métodos indican que los niveles de vulnerabilidad altos se encuentran directamente relacionados con los parámetros considerados, tales como conductividad hidráulica, tipo de subsuelo no saturado y cobertura de suelo, de tal manera que los rangos mayores obtenidos están asociados a sitios donde los depósitos permiten una infiltración rápida; los rangos de vulnerabilidad menores se relacionan con áreas donde el acuífero presenta depósitos arcillosos. La cobertura del suelo y tipo de litología en la zona no saturada evitan la rápida infiltración de los contaminantes hacia el medio acuífero.

La vulnerabilidad se ve afectada con la estacionalidad intra e interanual. Presentándose menores niveles de vulnerabilidad en los meses secos y mayores niveles de vulnerabilidad para la temporalidad húmeda, tanto para el método DRASTIC como para el método SINTACS. Así mismo para escalas inter anuales se presentan variaciones en los índices de vulnerabilidad debido a cambios en las variables, recarga neta potencial, escorrentía superficial y así mismo infiltración efectiva. Sin embargo, se presentaron valores de vulnerabilidad no esperados para el año 1994 (año con precipitación por debajo del promedio) en el método DRASTIC y para el año 2010 (año con precipitación por encima del promedio) en el método SINTACS. Esto se ve reflejado principalmente en las variables de recarga neta y precipitación mensual para acuífero.

Tanto el método DRASTIC como el método SINTACS son métodos más robustos en comparación al método GOD, debido a la cantidad de variables que cada método considera con sus respectivos grados de influencia en el acuífero y la cantidad tenida en cuenta para el cálculo de la vulnerabilidad. La metodología SINTACS presenta un nivel de detalle mayor debido a que considera un rango de vulnerabilidad adicional que se refleja en la obtención de los mapas. Sin embargo, la metodología GOD se considera más sencilla de aplicar por su reducido número de variables y su adaptabilidad en situaciones de escasa información y en donde no se tenga certeza en la calidad de los datos.

Con la generación de los mapas de vulnerabilidad y una base de datos con los parámetros utilizados, se espera aportar y apoyar acciones enfocadas a la protección del agua subterránea, sirviendo el presente estudio como base para la delimitación de las áreas más susceptibles a cambios negativos.

8. *Agradecimientos*

Agradezco a la coordinación y acompañamiento de los distintos docentes que hacen parte del departamento de Geología de la Universidad del Norte, especialmente a los docentes del área de Hidrogeología y a la profesora Natalia Hoyos Botero. De igual forma, agradezco además a mis padres y a mi compañera sentimental por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera.

9. *Referencias*

Agüero V.J. (2000). Análisis de Vulnerabilidad a la Contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Proyecto de Graduación: Ingeniería Civil- San José. Costa Rica, 130 pp.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC : A Standardized Method for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. NWWA/Epa-600/2-87-035, 455.

Auge, M. (2005). Vulnerabilidad de Acuíferos. Conceptos y Métodos. Ebook: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>. Entrada abril 2012.

Ben, N., & Villarroja, F. (2016). Aplicación del método DRASTIC para la cartografía de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de R ' mel (Larache , Marruecos) [Application of DRASTIC method for mapping vulnerability to contamination of aquifer R ' mel (Larache , Morocco)]. 17(3), 927–946.

Civita M. y De Maio M. (2000). Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5, Pitagora, Bologna, Italia, 226 pp.

Estrada Godoy, F. (2013). Aplicación del método SINTACS para la determinación de la vulnerabilidad acuífera en la cuenca del río Duero, Michoacan, Mexico, 29(4), 235-248.

Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Van Duijvenbooden W, Van Waegeningh HG (eds), Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. Proc Inf TNO Comm. Hydrol Res., The Hague 38: 69–86.

IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp

Inger Daniel, A. H. Á. (2015). Caracterización del régimen del viento y el oleaje en el litoral del departamento del Atlántico, Colombia Wind and wave regime characterization in the. *Bol. Cient. CIOH 2015; 33:231-244*, 231–244.

Instituto de Investigaciones e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear – INGEOMINAS. 1985. Hidrogeología de los Departamentos de Atlántico y Bolívar al Norte del Canal del Dique. Bogotá D.C., 290 pp.

Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Santafé de Bogotá D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

National Centers for Environmental Information. NOAA. (2020, junio 8). Southern Oscillation Index (SOI) | Teleconnections | National Centers for Environmental Information

(NCEI). Recuperado 22 de mayo de 2020, de

<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>

Nicoletti, F. and Spandre, R. (1996). Valoración del Riesgo de Contaminación de las aguas subterráneas por nitratos mediante el uso de los modelos paramétricos DRASTIC y SINTACS. *Ingeniería del Agua*, vol.3, No 4, pp. 7-24.

Tuesca, Rafael; Avila, H. (2015). Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano - Análisis de tendencia de variables para consolidar mapas de riesgo. (Universidad Del Norte, Ed.). Atlántico.

Valcarce O.R.M. y Rodríguez M.W.(2004). Vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos. In: IV Seminario-Taller. Protección de acuíferos frente a la contaminación: Protección de la calidad del agua. Lima, Perú.

Vargas Quintero, M. C. (2010). Propuesta Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la Contaminación. *Ministerio De Ambiente Vivienda Y Desarrollo Territorial*, 1(1021), 1–30. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

Ven Te, C. (1984). *Handbook of Applied Hydrology*. EEUU: McGraw Hill Book Company.

VRBA, J. and ZAPOROZEC, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Association of Hydrogeologists*, vol. 16. Ed. Heise.131p.

Anexos*Tabla A1. Parámetros de ponderación, método SINTACS*

Factor	Impacto normal (IN)	Impacto relevante (IR)	Drenaje (D)	Cárstico (C)	Fisurado (F)
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4
Σ	26	26	26	26	26

Tabla A2. Parámetros de ponderación, método DRASTIC

Parámetros	Peso
D – Profundidad	5
R – Recarga Neta	4
A – Medio Acuífero	3
S – Tipo de Suelo	2
T – Topografía	1
I – Impacto zona no saturada	5
C – Conductividad Hidráulica	3

Tabla A3. Valoración de intensidad del factor D

Profundidad del acuífero (m)	Valoración
0 – 0.15	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
>30.5	1

Tabla A4. Valoración del factor R

Recarga (mm)	Valoración
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
>254	9

Tabla A5. Valoración para el parámetro A

Tipo de acuífero	Rango de valoración
Lutitas masiva	1- 3
Metamórfica/Ígnea	2 - 5
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 – 5
Till glacial	4 – 6
Secuencias de arenisca, calizas y lutitas	5 – 9
Arenisca masiva	4 – 9
Caliza masiva	4 – 9
Arena o grava	4 – 9
Basaltos	2 – 10
Caliza Kárstica	9 – 10

Tabla A6. Valoración para el parámetro S

Tipo de suelo	Valoración
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Tabla A7. Valoración para el parámetro T

Pendiente (%)	Valoración
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

Tabla A8. Valoración del parámetro I

Naturaleza de la zona no saturada	Rango de valoración
Capa confinante	1
Cieno – arcilla	2 – 6
Lutitas	2 – 5
Caliza	2 – 7
Areniscas	4 – 8
Secuencias de areniscas, caliza y lutitas	4 – 8
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8
Metamórfica/ígnea	2 – 8
Grava y arena	6 – 9
Basalto	2 – 10
Caliza Kárstica	8 – 10

Tabla A9. Valoración del parámetro C

Conductividad hidráulica (cm/día)	Rango de valoración
0.04 – 4.08	1
4.08 - 12.22	2
12.22 – 28.55	3
28.55 – 40.75	6
40.75 – 81.49	8
>81.49	10

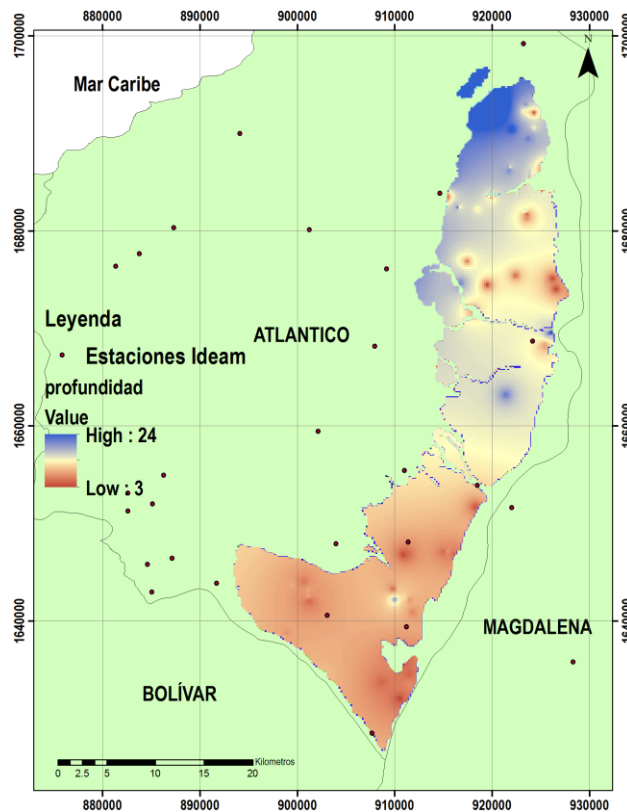


Figura A1. Profundidad del agua y estaciones climatológicas para el acuífero del río Magdalena.

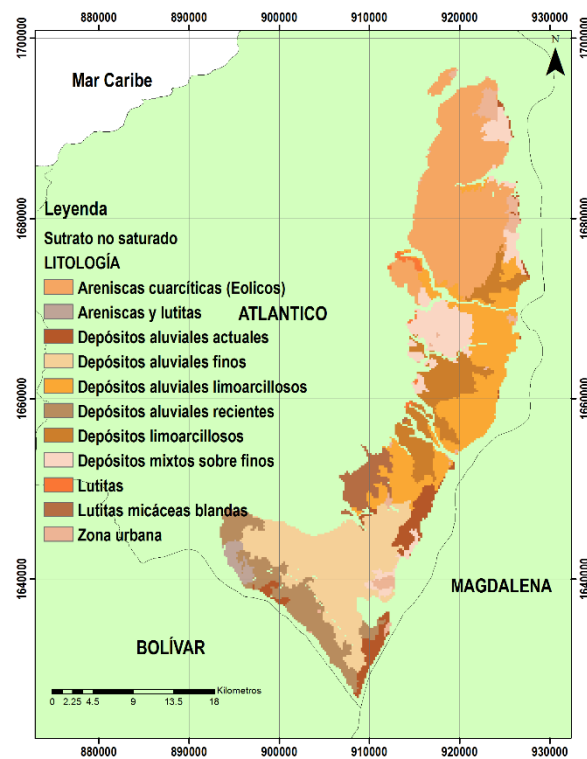


Figura A2. Sustrato no saturado para el acuífero Río Magdalena.